



Научная статья

2.6.13 – Процессы и аппараты химических технологий (технические науки)

УДК 632.122; 614.7; 622.882

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.021



ФИТОРЕМЕДИАЦИЯ КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЙ МЕТОД ОЧИСТКИ ПОЧВ ОТ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

Виктория Вячеславовна Бауэр ¹, Ольга Юрьевна Сартакова ²,
Ольга Михайловна Горелова ³

^{1, 2, 3} Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия

¹ victorya.bauer@yandex.ru

² olga-sartakova@yandex.ru

³ osgor777@mail.ru

Аннотация. Хозяйственная деятельность человека влечет за собой некоторую опасность для окружающей среды, в том числе для формирования и развития растительного покрова. Тяжелые металлы, способные снижать темпы роста биомассы растений, поступают в почву, водные объекты посредством деятельности человека, работы металлургических и энергетических предприятий, автомобильного транспорта, использования удобрений. Нередко наблюдается угнетение растительного покрова вплоть до его полного исчезновения. В частности, загрязнению тяжелыми металлами подвержены почвы сельскохозяйственных угодий Алтайского края, что в значительной степени влияет на количество и качество получаемой сельхозпродукции. Существует необходимость в поиске и апробации эффективных способов очистки почв от тяжелых металлов. Одним из таких методов является фиторемедиация, которая позволяет проводить рекультивацию земель и восстанавливает их продуктивность. Настоящая работа предполагает два этапа. На первом этапе изучается отклик растения овса посевного на наличие поллютантов в почве. На втором этапе предполагается изучение фитоаккумуляции поллютантов свинца и кадмия в биомассе растения и выявление возможности применения фиторемедиации овсом в технологии рекультивации почв сельскохозяйственных угодий Алтайского края. В качестве методов анализа применяли гравиметрию и биометрию растений. Установлен положительный отклик овса посевного на присутствие кадмия в почве в концентрациях, превышающих ПДК, что позволило рекомендовать использовать овес как потенциальный фиторемедиатор для проведения второго этапа исследований растений на атомно-абсорбционном спектрометре.

Ключевые слова: фиторемедиация, биомасса, сельскохозяйственные угодья, загрязненные почвы, тяжелые металлы, кадмий, свинец, овес, посевной рекультивация почвы, гравиметрия, биометрия.

Для цитирования: Бауэр В. В., Горелова О. М., Сартакова О. Ю. Фиторемедиация как перспективный метод очистки почв от тяжелых металлов // Ползуновский вестник. 2023. № 2. С. 160–165. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.021. EDN: <https://elibrary.ru/GXGPPD>.

Original article

PHYTOREMEDIATION AS A PROMISING METHOD OF SOIL PURIFICATION FROM HEAVY METALS

Victoria V. Bauer ¹, Olga Y. Sartakova ², Olga M. Gorelova ³,

^{1, 2, 3} Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

¹ victorya.bauer@yandex.ru

² olga-sartakova@yandex.ru

³ osgor777@mail.ru

© Бауэр В. В., Сартакова О. Ю., Горелова О. М., 2023

ФИТОРЕМЕДИАЦИЯ КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЙ МЕТОД ОЧИСТКИ ПОЧВ ОТ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

Abstract. Human economic activity entails some danger to the environment, including the formation and development of vegetation cover. Heavy metals that can reduce the growth rate of plant biomass enter the soil, water bodies through human activities, the work of metallurgical and energy enterprises, road transport, and the use of fertilizers. Often there is a suppression of the vegetation cover up to its complete disappearance. In particular, the soils of agricultural lands of the Altai Territory are subject to contamination with heavy metals, which largely affects the quantity and quality of agricultural products. There is a need to find and test effective ways to clean soils from heavy metals. One of these methods is phytoremediation, which allows for land reclamation and restores their productivity. The present work involves two stages. At the first stage, the response of the oat plant to the presence of pollutants in the soil is studied. At the second stage, it is planned to study the phytoaccumulation of lead and cadmium pollutants in the plant biomass and to identify the possibility of using oat phytoremediation in the technology of soil reclamation of agricultural lands in the Altai Territory. Gravity and biometrics of plants were used as methods of analysis. A positive response of oats to the presence of cadmium in the soil in concentrations exceeding the MPC was established, which made it possible to recommend the use of oats as a potential phytoremediator for the second stage of plant studies on an atomic absorption spectrometer.

Keywords: phytoremediation, biomass, agricultural land, polluted soils, heavy metals, cadmium, lead, oats, sowing soil reclamation, gravimetry, biometrics.

For citation: Bauer, V.V., Sartakova, O. Y., Gorelova, O.M. (2023). Phytoremediation as a promising method of soil purification from heavy metals. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 160-165. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.021. EDN: <https://elibrary.ru/GXGPPD>.

ВВЕДЕНИЕ

Современная экологическая обстановка требует решения проблем, связанных с антропогенной нагрузкой. Предпочтение отдается методам, в основе которых лежат естественные процессы, так как это наиболее благоприятно и безопасно для человека и окружающей среды.

Алтайский край – сельскохозяйственный регион, и по праву считается житницей России. Край располагает землями сельскохозяйственного назначения в количестве 11,5 млн га. Однако существует проблема ухудшения плодородия почвы за счет негативного воздействия антропогенных факторов. Снижение плодородия почвы непосредственно влияет на качество и количество урожая.

По данным открытых источников, в 2022 г. на территориях земель сельскохозяйственного назначения Алтайского края было установлено превышение ПДК по некоторым тяжелым металлам, в том числе свинцу, кадмию. Общая площадь загрязнения составила 8,7 га. Для восстановления почвы требуется проводить ее рекультивацию, и эта задача становится в последние годы весьма актуальной [1].

Перспективным биологическим методом является фиторемедиация. Данный метод базируется на использовании растений для очищения объектов окружающей среды от экотоксикантов.

Особенностью и положительным аспектом применения фиторемедиации является то, что в данном случае используются расте-

ния, которые имеют способность к накоплению загрязняющих веществ. Загрязнения в дальнейшем можно удалить из почвы вместе с растениями. Также растения можно использовать для аккумуляции тяжелых металлов из почвы [2].

Поглощение загрязнений происходит за счет процесса проникновения тяжелых металлов в ткани растения через корневую систему [3].

Гипераккумуляция поллютантов является характерным свойством фиторемедиаторов. Другие растения, как правило, испытывают угнетение в присутствии экотоксикантов.

При попадании тяжелых металлов в биомассу растения можно наблюдать следующие признаки: сокращение размеров как надземной части растения, так и корневой системы, уменьшение массы. Визуально можно оценить также сокращение размеров листовой пластинки [4].

Тяжелые металлы могут вызывать депрессию у растения на любых этапах органогенеза. Это происходит за счет того, что значительно сокращается скорость деления клеток, вплоть до полной остановки процесса [5].

Поглощение тяжелых металлов растениями происходит в два этапа: поллютанты попадают в свободное клеточное пространство, а затем устремляются вглубь клетки [6].

Вероятно, способность растений к накоплению тяжелых металлов связана, прежде всего, с механизмами защиты от губительного действия токсикантов. В аккумулярованном

состоянии тяжелые металлы не могут распространяться по клеткам растения [7].

Актуальность использования растений для очистки почв от тяжелых металлов дополнительно подкрепляется тем фактом, что эти загрязнители преимущественно концентрируются в верхнем слое почвенного профиля и не распространяются вглубь почвы. Указанная транслокация токсичных элементов упрощает решение задачи рекультивации почвы.

По данным исследований [8], установлено, что растения, относящиеся к семействам злаковых, отличаются способностью к выделению фитосидерофоров [9]. Данные вещества попадают в слой почвы, который непосредственно контактирует с корневой системой растения, и ускоряют поглощение тяжелых металлов, переводя загрязнители в подвижную форму [10]. Этот факт позволил рассматривать злаковые культуры как потенциально возможные растения для фиторемедиации.

Кроме того, исходя из информации литературных источников, наиболее устойчивым к различным загрязнениям почвы является овес посевной *Avenasativa* [8].

Целью настоящих исследований являлось выявление устойчивости овса посевного к ионам тяжелых металлов и возможности его использования в качестве фиторемедиатора для рекультивации загрязненных почв посредством многократного посева злака и утилизации зрелых растений.

В качестве субстрата для тестирования использовался образец суглинистой почвы. Такой выбор обусловлен ее распространенностью на пахотных землях Алтайского края.

В качестве потенциально угнетающих факторов изучалось влияние тяжелых металлов кадмия и свинца в концентрациях, наиболее часто встречающихся на загрязненных территориях Алтайского края.

Присутствие кадмия в почве в качестве поллютанта обусловлено его накоплением на территориях сельскохозяйственных угодий по причине внесения в землю суперфосфата. Суперфосфат относится к сельскохозяйственным удобрениям, которые активно применяют на территории Алтайского края. Кадмий же является составной частью данного удобрения и добавляется в состав в качестве примеси. Содержание кадмия в смеси удобрения варьируется от 2,2 мг/кг до 3,5 мг/кг. В результате внесения удобрения в почву может происходить его систематическое накопление, а при наличии определенных условий возрастает и скорость поглощения металла растением [11].

Свинец является наиболее распространенным тяжелым металлом, который попадает в окружающую среду, в основном, с выбросами от автотранспорта, в том числе сельскохозяйственной техники. Свалки бытовых отходов, в которых присутствует аккумуляторный лом, отработанные батарейки.

Кроме этого, кадмий и свинец могут проникать в почву при использовании неподготовленных осадков сточных вод для повышения плодородия почвы.

МЕТОДЫ

Для внесения тяжелых металлов в почву были подготовлены навески растворимых солей тяжелых металлов $Pb(NO_3)_2$ и $Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$.

Навески соли свинца $Pb(NO_3)_2$ были взяты в количестве 0,20; 0,40; 1,00; 1,18 г на 1 кг почвенного субстрата. Для соли кадмия $Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ были взяты навески 0,004; 0,008; 0,014; 0,026 г на 1 кг почвенного субстрата.

Соответственно, в концентрациях Pb^{2+} в почвенном субстрате составила 0,12; 0,25; 0,62; 0,73 г/кг, концентрация Cd^{2+} достигала 0,002; 0,003; 0,005; 0,009 г/кг.

Указанные навески солей растворяли в 10 мл воды и вносили в почву. Почва стабилизировалась в течение трех суток, затем использовалась для посева.

Семена предварительно проращивались по ГОСТ 12038-84 на бумажных фильтрах в воздухопроницаемых боксах при благоприятном температурном режиме и необходимой степени увлажнения. Срок выдерживания семян до появления проростка составил трое суток.

Далее производилась высадка проросших семян в почву исследуемых образцов и наблюдение за ними в течение 14 дней. На протяжении роста растений производился визуальный контроль всходов, оценивались и корректировались следующие показатели: температурный, влажностный режимы, а также степень освещенности.

В фазе экспоненциального роста ростки аккуратно изымались из почвенного субстрата, промывались, остаточная влага удалялась.

При гравиметрии производилось взвешивание всего растения на аналитических весах, биомасса овса посевного оценивалась в мг.

При биометрии исследуемые растения предварительно разделялись на наземную и подземную части, после чего анализировались: оценивался размер каждой части растения в мм.

ФИТОРЕМЕДИАЦИЯ КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЙ МЕТОД ОЧИСТКИ ПОЧВ ОТ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

РЕЗУЛЬТАТЫ

Данные результатов проведенных исследований представлены на рисунках 1–4.



Рисунок 1 – Биометрические показатели овса, выращенного на почве, обогащенной свинцом

Figure 1 – Biometric indicators of oats grown on lead-enriched soil



Рисунок 2 – Гравиметрические показатели овса, выращенного на почве, обогащенной свинцом

Figure 2 – Gravimetric indicators of oats grown on lead-enriched soil

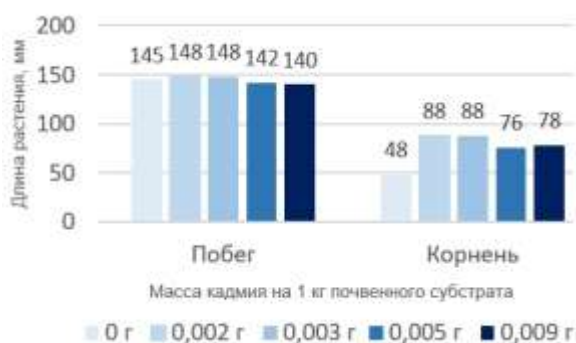


Рисунок 3 – Биометрические показатели овса, выращенного на почве, обогащенной кадмием

Figure 3 – Biometric indicators of oats grown on cadmium-enriched soil



Рисунок 4 – Гравиметрические показатели овса, выращенного на почве, обогащенной кадмием

Figure 4 – Gravimetric indicators of oats grown on cadmium-enriched soil

ОБСУЖДЕНИЕ

Как видно из диаграмм (рисунки 1–2), свинец оказывал угнетающее воздействие на овес, наблюдалось выраженное подавление роста биомассы и размеров растений как надземной, так и корневой части. Вероятно, овес не обладает устойчивостью к свинцу в условиях эксперимента.

Результаты биометрии и гравиметрии при выращивании растений на субстратах с ионом Cd^{2+} выявили относительную стабильность овса при низких концентрациях загрязнителя и подавление роста при больших содержаниях кадмия (рисунки 3 и 4).

Овес показал незначительное увеличение надземной части при низких концентрациях иона Cd^{2+} (0,002 г и 0,003 г на 1 кг почвы) и стабильный прирост подземной части растения на всем диапазоне изученных концентраций.

Кроме того, фиксировалось незначительное увеличение биомассы растений на тех же концентрациях кадмия 0,002 и 0,003 г на 1 кг почвы.

Прирост биомассы и увеличение биометрических показателей относительно эталона на низких концентрациях соли кадмия могли быть обусловлены биогенным влиянием нитрата. При повышении содержания загрязнителя в почве наблюдалась депрессия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявленное на данном этапе работы увеличение массы и размеров овса посевного, вероятно, связано с поглощением и отложением кадмия в биомассе растения, воздействием тяжелого металла на клетки овса как стимулятора, обеспечивающего рост растения. Вместе с тем, возможно проявление би-

нарной оппозиции – влияние биогенной и токсичной составляющих соли нитрата кадмия на рост и развитие растения.

Полученные и представленные в настоящей работе данные позволяют перейти ко второй части исследований и рассматривать возможность применения овса посевного как потенциального фиторемедиатора кадмия из загрязненных почв.

Утверждение данного предположения об аккумуляции овсом кадмия в собственной биомассе возможно только при исследовании корневой и надземной части растений на атомно-абсорбционном спектрометре, что является следующим этапом исследований.

В случае подтверждения аккумуляции кадмия в биомассе растения появляется перспектива использования овса как фиторемедиатора и применение его в технологии рекультивации почв сельскохозяйственных угодий на территории Алтайского края.

Представленные данные показывают сокращение биометрических и гравиметрических показателей овса. Чем выше концентрация свинца в почвенном субстрате, тем больше степень угнетения растения. При максимальной концентрации свинца биомасса растения и размер как надземной, так и корневой части снижаются более чем на 50 %. Установленная динамика свидетельствует об отсутствии у овса посевного устойчивости к данному тяжелому металлу, поэтому этот злак можно рекомендовать в качестве биоиндикатора на наличие свинца в почве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ежегодник. Загрязнение почв Российской Федерации токсикантами промышленного происхождения в 2021 году. Обнинск : ФГБУ «НПО «Тайфун», 2022. 131 с.
2. Фиторемедиация технонарушенных территорий / Э.М. Зайнутдинова, Г.Г. Ягафарова, Е.А. Шамсудинова, А.К. Мазитова // Вестник Казанского технологического университета. 2017. № 6. С. 157–159.
3. Андреева И.В. Фиторемедиация почв, загрязненных тяжелыми металлами // Природообустройство. 2009. № 5. С. 7.
4. Добровольский В.В. Глобальная система массопотоков тяжелых металлов в биосфере // Рассеянные элементы в бореальных лесах. М. : Наука, 2004. С. 23–30.
5. Ильин В.Б. Тяжелые металлы и неметаллы в системе почва – растение. Новосибирск : СО РАН, 2012. 220 с.
6. Башмаков Д.И. Особенности адаптации к тяжелым металлам у растений из разных жизненных форм и экологических групп // ИВУЗ ПР Естественные науки. 2022. № 2 (38). С. 59–68.
7. Титов А.Ф., Таланова В.В., Казнина Н.М., Лайдинен Г.Ф. Устойчивость растений к тяжелым

металлам. Институт биологии КарНЦ РАН. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. 172 с.

8. Титов А.Ф., Казнина Н.М., Таланова В.В. Тяжелые металлы и растения. Петрозаводск : Карельский научный центр РАН, 2014. 194 с.

9. Rascio N. & Navarilzzo F. (2011). Heavy metal hyperaccumulating plants: how and why do they do it? And what makes them so interesting? *Plant Science*. 81.

10. Иванов В.Б., Быстрова Е.И., Серегин И.В. Сравнение влияния тяжелых металлов на рост корня в связи с проблемой специфичности и избирательности их действия // Физиология растений. 2003. Т. 50, № 3. С. 445–454.

11. Слабко Ю.И., Лопатина А.А. Аккумуляция кадмия в почве и растениях сои под влиянием минеральных удобрений // Вестник КрасГАУ. 2016. № 2. С. 19–23.

Информация об авторах

В. В. Бауэр – студентка 4 курса группы ЭРПХ-91, направления бакалавриата «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии», АлтГТУ.

О. Ю. Сартакова – кандидат технических наук, доцент кафедры химической техники инженерной экологии института биотехнологий, пищевой и химической инженерии АлтГТУ.

О. М. Горелова – кандидат технических наук, доцент кафедры химической техники инженерной экологии института биотехнологий, пищевой и химической инженерии, АлтГТУ.

REFERENCES

1. Yearbook. Soil pollution of the Russian Federation by toxicants of industrial origin in 2021. (2022). Obninsk: FGBU "NPO "Typhoon". (In Russ.).
2. Zainutdinova, E.M., Yagafarova, G.G., Shamsutdinova, E.A., Mazitova, A.K. (2017). Phytoremediation of techno-destroyed territories. Bulletin of the Kazan Technological University. (6). 157-159. (In Russ.).
3. Andreeva, I.V. (2009). Phytoremediation of soils polluted with heavy metals. Environmental management. No. 5. Retrieved from <https://cyberleninka.ru/article/n/fitoremediatsiya-pochv-zagryaznennyh-tyazhelymi-metallami-1>.
4. Dobrovolsky, V.V. (2004). Global system of mass flows of heavy metals in the biosphere. Scattered elements in boreal forests. M. : Nauka, 23-30. (In Russ.).
5. Ilyin, V.B. (2012). Heavy metals and non-metals in the soil-plant system. Novosibirsk : SO RAN. (In Russ.).
6. Bashmakov, D.I. (2022). Peculiarities of adaptation to heavy metals in plants from different life forms and ecological groups. IVUZ PR Natural Sciences. 2 (38). Retrieved from <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-adaptatsii-k-tyazhelym-metallam-u-rasteniy-iz-raznyh-zhiznennyh-form-i-ekologicheskikh>

ФИТОРЕМЕДИАЦИЯ КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЙ МЕТОД ОЧИСТКИ ПОЧВ ОТ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

grupp. (In Russ.).

7. Titov, A.F., Talanova, V.V., Kaznina, N.M., Laidinen, G.F. (2007). Plant resistance to heavy metals. Institute of Biology KarRC RAS. Petrozavodsk: Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. (In Russ.).

8. Titov, A.F., Kaznina, N.M., Talanova, V.V. (2014). Heavy metals and plants. Petrozavodsk: Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. (In Russ.).

9. Nicoletta, Rascio, Flavia, Navarilzzo (2011). Heavy metal hyperaccumulating plants: how and why do they do it? And what makes them so interesting? Plant Science. (In Russ.).

10. Ivanov, V.B., Bystrova, E.I., Seregin, I.V. (2003). Comparison of the effect of heavy metals on root growth in connection with the problem of specificity and selectivity of their action. Plant Physiology. 50(3). 445-454. (In Russ.).

11. Slabko, Yu.I., Lopatina, A.A. (2016). Cadmium accumulation in soil and soybean plants under the influence of mineral fertilizers. Bulletin of Krasgau. (2). Retrieved from [https://cyberleninka.ru / article/n/accumulation-](https://cyberleninka.ru/article/n/accumulation-)

[of-cadmium-in-soil-and-soybean-plants-under-the-influence-of-mineralnyh-udobreniy/viewer.](#) (In Russ.).

Information about the authors

V.V. Bauer - is a 4th-year student of the ERPH-91 group, bachelor's degree in "Energy and resource-saving processes in chemical Technology, Petrochemistry and Biotechnology", Polzunov Altai State Technical University.

O.Yu. Sartakova - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemical Engineering of Environmental Engineering of the Institute of Biotechnology, Food and Chemical Engineering of Polzunov Altai State Technical University.

O.M. Gorelova - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemical Engineering of Environmental Engineering of the Institute of Biotechnology, Food and Chemical Engineering of Polzunov Altai State Technical University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 28.01.2023; одобрена после рецензирования 13.05.2023; принята к публикации 11.06.2023.

The article was received by the editorial board on 28 Jan 2022; approved after editing on 13 May 2023; accepted for publication on 11 June 2023.